

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství**

**Nakládání s radioaktivními odpady
Radioactive Waste Handling**

Bakalářská práce

Autor:

Jan Kysela

Vedoucí bakalářské práce: Ing.

Miluš Hlavatá, Ph.D.

Most 2010

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Kysela

Studijní program:

B2102 Nerostné suroviny

Studijní obor:

3904R022 Zpracování a zneškodňování odpadů

Téma:

Nakládání s radioaktivními odpady
Radioactive Waste Handling

Zásady pro vypracování:

Kvalifikační práce bude zpracována podle následující osnovy:

1. Úvod
2. Legislativní podmínky pro nakládání s radioaktivními odpady (RAO)
3. Nakládání s RAO v zahraničí a ČR
4. Úprava RAO před uložením
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Platná legislativa, zejm. zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, včetně prováděcích právních předpisů.
2. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR (usnesení vlády č. 487/2002). Dostupný z WWW: <<http://www.vidivici.cz/surao2/index.php?c=348&s=tisk>>.
3. Úložiště RAO. Dostupný z WWW: <http://www.vidivici.cz/surao2/index.php?Lang=CS&r=uloziste_rao>.
4. Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnost jadrovej energie. SÚJB. 1993-. Praha : Fokus, s.r.o., Doláková 24/536, 181 00 Praha 8. 6xročně.

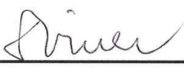
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

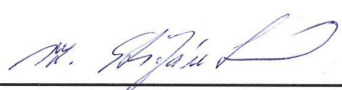
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miluše Hlavatá, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2009

Datum odevzdání: 15.04.2010




prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
vedoucí institutu


prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.

- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své potřebě, bakalářskou práci užívat (§ 35 odst. 3).

- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřel licenci smlouvu s oprávněním užívat dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě odemne požadovat příslušné příspěvky na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Mostě dne

.....
Ja

.....
nKysela

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Miluši Hlavatě, Ph.D. za vedení průběžné vypracování diplomové práce a státní organizaci Správa úložišť radioaktivních odpadů za poskytnuté informace, data, dokumenty a zprostředkování exkurze do úložiště radioaktivních odpadů Richard.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na nakládání s radioaktivními odpady. V první části se zabývá legislativními podmínkami nakládání s radioaktivními odpady. Následují způsoby nakládání s radioaktivními odpady v zahraničí a v ČR se zaměřením na úložiště RAO Richard. V další části se zabývá úpravou RAO před uložením. V závěru je shrnutí informací o způsobech nakládání s radioaktivními odpady.

Klíčová slova: Atomový zákon, sazby za uložení RAO, úložiště RAO Richard, úložiště RAO Bratrství, úložiště RAO Dukovany, hlubinné úložiště, přepracování RAO, transmutace ADTT.

Abstract

This work is focused on radioactive waste management. In the first part is focused on legislative requirements of Radioactive Waste Management. The following are ways of dealing with radioactive waste in the Czech Republic and abroad, focusing on radioactive waste repository, Richard. The next section deals with the rules before saving the RAW. The conclusion is a summary of information on radioactive waste management.

Keywords: The Atomic Act, Rates for storing radioactive waste, Richard RAW repository, Bratrství RAW repository, Dukovany RAW repository, deep repository, RAW reprocessing, transmutation ADTT.

OBSAH

1.ÚVOD.....	1
2.Legislativní podmínky pronákladání radioaktivních odpadů (RAO).....	2
2.1 Odpovědnost za odpady dle platných legislativních podmínek.....	2
2.2 Sazby odvodů za ukládání RAO.....	4
3.Nakládání s RAO v zahraničí a ČR.....	5
3.1. Radioaktivní záření.....	5
3.1.1 Druh radioaktivního záření.....	5
3.1.2 Měření radioaktivního záření.....	6
3.1.3 Zdroje radioaktivního záření.....	6
3.2 Rozdělení a kategorizace radioaktivních odpadů (RAO).....	8
3.3 Nakládání s RAO v ČR.....	9
3.3.1 Úložiště radioaktivních odpadů Richard.....	10
3.3.2 Úložiště radioaktivních odpadů Bratrství–Jáchymov.....	14
3.3.3 Úložiště radioaktivních odpadů Dukovany.....	16
3.4 Nakládání s vysoce aktivními odpady.....	18
3.5 Ukládání radioaktivních odpadů v zahraničí.....	18
3.5.1 Švédsko.....	18
3.5.2 Německo.....	19
3.5.3 Belgie.....	19
3.5.4 Finsko.....	20
4.Úprava RAO podle uložením.....	22
4.1. Nakládání s nízkou aktivitou (institucionálním).....	22
4.2. Nakládání s nízkou aktivitou (z provozu JE).....	23
4.3. Nakládání s vyhořelým palivem z jaderných elektráren.....	24

4.3.1	Kontejnery pro transport a skladování...	.....	.26
4.3.2	Přehled o zpracování vyhořelého jaderného paliva.....	.....	27
4.3.3	ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology).....	.....	28
5.	Závěr.....	.....	30
6.	Literatura.....	.....	31

1. Úvod a cíl práce

Jednou ze složek odpadu, který vzniká v důsledku lidské činnosti, je radioaktivní odpad. I když tohoto odpadu v porovnání s objemy ostatních odpadů není mnoho, má pro životní prostředí a pro člověka škodlivé účinky. Jedná se zejména o radioaktivitu a radiotoxicitu. Proto si nakládání s těmito odpady zasluhuje zvláštní pozornost. Vliv radioaktivního záření na člověka autorem již dlouhou dobu zajímá. Byl ovlivněn možností vzniku jaderné války a následného zamoření velké části planety, ale i havárií jaderné elektrárny Černobyl. Zaujal ho proto možnost hlouběji zkoumat radioaktivní záření, které radioaktivní odpady vyvíjejí, jejich složení, radiotoxicita, poločas rozpadu a možnost oddělení těchto negativních vlivů od životního prostředí. Dalším důvodem, proč se autor rozhodl zpracovat toto téma, je fakt, že zásoby fosilních paliv nejsou nekonečné a lidstvo, dříve nebo později, bude muset přistoupit k řešení tohoto problému. Řešení, které se v současné době nabízí, je výstavba nových jaderných elektráren. To souvisí se zvýšenou produkcí radioaktivních odpadů a následnou nutností využití nebo konečného zneškodnění těchto odpadů.

Cílem práce je objasnění vzniku radioaktivního odpadu, vlivu radioaktivního záření na člověka, možnost zneškodnění, ale i možnost dalšího využití tohoto odpadu. Nedílnou součástí práce jsou legislativní podmínky nakládání s radioaktivními odpady v ČR.

2. Legislativní podmínky pro nakládání s radioaktivními odpady (RAO)

Nakládání s radioaktivními odpady v České republice upravuje zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) [1].

Pro zajišťování činností spojených s ukládáním radioaktivních odpadů zřídilo Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR od 1. 6. 1997 státní organizaci Správu úložišť radioaktivních odpadů (dále jen SÚRAO), která zajišťuje činnosti spojené s ukládáním radioaktivních odpadů vyhořelého jaderného paliva. [1][2].

V souladu se zákonem č. 18/1997 Sb. byl ak 1. 1. 2000 převedena existující úložiště RAO na SÚRAO. Tímto převezl stát odpovědnost za ukládání RAO [2].

V červnu roku 2001 byla ministerstvem průmyslu a obchodu přijata „Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR“ (dále jen Koncepce). Tento dokument formuluje strategii státu a státních orgánů přibližně do roku 2025, s výhledem až do konce 21. století [2]. „Cílem koncepce je:

- stanovit strategicky opodstatněné, vědecky, technologicky, ekologicky, finančně a společensky přijatelné zásady pro nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR,
- vytvořit základní systémový rámec pro rozhodování orgánů a organizací odpovědných za nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR,
- srozumitelným způsobem sdělit informaci o dlouhodobém řešení způsobu nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem všem dotčeným subjektům i širší veřejnosti“ [2].

2.1 Odpovědnost za odpady dle platných legislativních podmínek

Původce radioaktivních odpadů – jsou to právnické nebo fyzické osoby, u kterých v důsledku jejich činnosti vznikají nebo mohou vzniknout RAO. Původcem RAO jsou i osoby, kterým RAO vzniknou až po ukončení provozu (při vyřazení jejich zařízení či pracoviště z provozu). Původcem je zpravidla držitel nebo žadatel o povolení státního

úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB) k činnostem spojeným s nakládáním se zdroji ionizujícího záření [2][3].

- Původce zodpovídá za nakládání s RAO před jejich uložením.
- Původce RAO nese veškeré náklady spojené s nakládáním s nimi, od doby jejich vzniku až po uložení, včetně nákladů na monitorování úložišť po jejich uzavření a potřebné výzkumné a vývojové práce [2][3].

Držitelé povolení SÚJB – jsou podle § 18 zákona č. 18/1997 Sb. povinni:

- vypracovávat a předávat SÚRAO údaje o krátkodobé i dlouhodobé tvorbě RAO a vyhořelého jaderného paliva a tyto odhadovat a aktualizovat v pětiletých intervalech,
- vytvářet finanční rezervy k zajištění výřazování jaderných zařízení nebo pracovišť s významným nebo velmi významným zdroji ionizujícího záření z provozu,
- vypracovávat a předávat SÚRAO podklady pro stanovení výše a způsobu odvádění prostředků na jaderný účet [1][2].

Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) – na základě Koncepce:

- přebírá odpovědnost za uložení RAO,
- zajišťuje bezpečné skladování RAO, které nelze uložit do stávajících úložišť do doby jejich konečného zneškodnění,
- zajišťuje odvodnu jaderných účtů a vypracovává podklad na jejich stanovení,
- řídí a realizuje výzkumné programy pro nakládání s RAO zaměřené na pokročilé technologie, které umožňují minimalizaci objemu RAO k uložení a na pokročilé metody zpracování a úpravy RAO [2].

Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) v souladu se zákonem č. 18/1997 Sb.:

- podle § 26 o věřování nákladů na vyřazování RAO,
- podle § 26 je povinná vést evidenci úvodců RAO a evidenci převzatých RAO,
- podle § 31 je povinná převzít RAO od odpovědných osob v případě, že tyto odpady splňují podmínky přijatelnosti k uložení ve stávajících úložištích,
- podle § 31 je povinná převzít nebo nakládat s RAO i v případě, že nevyhovují podmínkám přijatelnosti. V tomto případě SÚRAO na náklady původce zajistí úpravu RAO do formy splňující podmínky přijatelnosti do úložiště nebo jeho bezpečné skladování do doby, než budou vytvořeny podmínky pro konečné řešení.

- podle § 31 RAO v okamžiku převzetí odp. úvodce přecházejí do vlastnictví státu. Předání a převzetí RAO si SÚRAO a úvodce navzájem písemně potvrdí [1].

2.2 Sazby odvodu účelů ukládání RAO

Tuto problematiku řeší nařízení vlády č. 416/2002. V souladu s tímto nařízením se prostředky na jaderný účel neodvádějí zálohově, ale jednorázově až při převzetí RAO k uložení nebo skladování [4] [5].

- **Sazba odvodu za převzetí standardní jednotky upravených RAO k uložení (OU).**

Jde o sazbu za uložení standardní jednotky RAO (200 l sud), která vyhovuje podmínkám přijatelnosti ukládání v úložišti Dukovany, Richard nebo Bratrství. Tajestano vevyšší:

$$OU = 23096 \text{ Kč}$$

- **Sazba odvodu za převzetí standardní jednotky upravených RAO, které nesplňují podmínky přijatelnosti ukládání, ale splňují podmínky přijatelnosti skladování (OSU).**

Jde o sazbu za převzetí standardní jednotky RAO (200 l sud), která není přijatelná k uložení dle stávajících úložišť, zd. úvodce splnění podmínek přijatelnosti pro vyšší objemové koncentrace krátkodobých beta a gama nuklidů nebo zd. úvodce splnění podmínek přijatelnosti pro vyšší objemové koncentrace alfa nuklidů, ale splňují podmínky přijatelnosti pro skladování. Tajestano vevyšší :

$$OSU = 25772 \text{ Kč}$$

[5]

3. Nakládání s RAO v zahraničí a v ČR

Nejdůležitějším aspektem při volbě úložného systému je koncentrace a poločas rozpadu radioaktivní látky, kterou chceme uložit. Zjednodušeně je můžeme rozdělit na krátkodobé – s poločasem rozpadu do 30 let a dlouhodobé – s poločasem přesahujícím 30 let. U nízké a středně aktivních radioaktivních odpadů krátkodobých můžeme použít přípovrchové úložiště, kde budou umístěny po dobu 300–500 let. Nízké a středně aktivní odpady dlouhodobé, vysokoaktivní odpady a vyhořelé palivo musíme izolovat od biosféry v hlubinném úložišti umístěném v stabilním geologickém prostředí, kde budou uloženy po dobu 100 000 let a více [4].

Před srovnáním konkrétních způsobů nakládání s RAO u nás a v zahraničí je nutné vysvětlit, jaké jsou druhy radioaktivního záření, jakým způsobem a v jakých jednotkách se radioaktivní záření měří a jaké zdroje záření působí v životním prostředí.

3.1. Radioaktivní záření

Využívání reakce štěpení jader uranu je doprovázeno jevem, který nazýváme ionizující záření. Toto záření vzniká přeměnou nestabilních atomů. Vlivem ionizujícího záření se mění fyzikální stav atomů – atomy v ionizujícím záření se sami stávají ionizovanými a elektricky nabitými. Ionizující záření je lidským smyslem nepocítitelné [6].

3.1.1 Druhy radioaktivního záření

Rozeznáváme několik druhů ionizujícího záření, které se od sebe vzájemně liší:

- **Záření alfa** - je to proud rychle letících jader helia, má kladný elektrický náboj. Je vyzařováno některými těžkými prvky jako je thorium, uran a radium.
- **Záření beta** - je proud elektronů (záporný náboj) nebo pozitronů (kladný náboj). Toto záření provází mnoho přeměn přírodních i umělých radionuklidů.
- **Záření gama** - je to elektromagnetické záření s krátkou vlnovou délkou. Toto záření vzniká při radioaktivní přeměně nestabilních jader.
- **Záření X** - jedná se o rentgenové záření. Má menší pronikavost než záření gama.
- **Neutrony** - je to proud nenabitých jaderných elementárních částic. Tento druh energie vyvolává nepřímo ionizaci původně neutrálního atomu za vzniku kladně

nabytého ionu a volného záporného elektronu. Zdrojem neutronů je štěpná reakce uranu [7].

3.1.2 Měření radioaktivního záření

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq). Jednotka jeden becquerel se rovná jedné jaderné přeměně za jednu sekundu. Pokud se v obalu RAO stane 20 000 přeměn jader za sekundu, znamená to, že obsah aktivity v obalu je 20 000 Bq. Aktivita těla člověka je několik tisíc Bq. Aktivita upůdy je normálně 30 000 Bq/t a u stavebního materiálu se pohybuje mezi 50 000 až 200 000 Bq/t. Jelikož je becquerel nepatrná jednotka, používají se její násobky [6].

Měří-li se vliv radioaktivity na zdraví člověka, musí se použít jiné jednotky, než je becquerel, a to sievert (Sv). Je to jednotka efektivního dávkového ekvivalentu, nebo-li radiační dávky. Jednotka jeden sievert je příliš velkou jednotkou, a proto používáme její tisícinu - milisievert (mSv). K vyjádření intenzity záření se používá veličina „příkon dávkového ekvivalentu“ za jednotku času. Nejčastěji se měří příkon dávkového ekvivalentu v jednotkách milisievert (mSv/h) nebo mikrosievert za hodinu ($\mu\text{Sv/h}$) [6].

3.1.3 Zdroje radioaktivního záření

Zdroje radioaktivního záření se rozdělují na přírodní a umělé. Přírodní zdroje jsou takové, které se v našem životním prostředí vyskytují přirozeně. Umělé zdroje radioaktivního záření vznikají lidskou činností. Z výsledného grafu zdrojů radioaktivního záření vyplývá, že největší vliv na člověka mají přírodní zdroje radioaktivního záření. (obrázek č. 1.)

Přírodní zdroje radioaktivního záření:

- **Kosmické záření:** proniká námi přes elektromagnetické pole Země z kosmického prostoru. Roční radiační dávka, kterou člověk obdrží, se zvyšuje s nadmořskou výškou. Nejnižší dávku obdrží u mořské hladiny - 0,03 mSv/rok a nejvyšší při letu letadlem ve výšce 10 000 m - 5 mSv/rok [6].

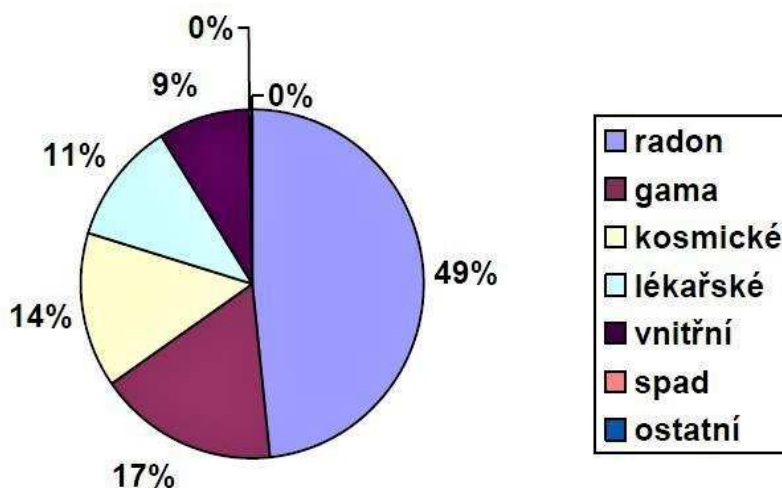
- **Gama záření:** Vzhledem k tomu, že je zemská kůra přirozeně radioaktivní, je i zdrojem gama záření. Gama záření Země způsobují horniny obsahem uranu a thoriumu. Intenzita gama záření se liší v závislosti na složení podloží. Jedná se o hodnoty od 0,5 mSv/rok do 260 mSv/rok [8].
- **Vnitřní ozáření:** Nejsilnějším zdrojem vnitřního ozáření člověka je draslík ^{40}K . Množství draslíku ^{40}K v těle se pohybuje kolem 200 gramů. Dalším zdrojem vnitřního ozáření je tritium ^3H a uhlík ^{14}C [8].
- **Radon:** Je to přirodní radioaktivní plyn, který vzniká rozpadem uranu. Je emitován z hornin a půdy v některých se vyskytuje i ve vzduchu. Pokud proniká do obytných budov, postupně se zde hromadí. Celosvětový průměrný roční dávkový z radonu je 1,3 mSv. V místech, kde se vyskytuje uranové podloží, mohou být mnohonásobně vyšší [6].

Umělé zdroje záření

- **Lékařské aplikace:** Až jednat řetina ionizujícího záření, které působí na člověka z umělých zdrojů, připadá na lékařské vyšetření. Jedná se o rentgeny plic, zubů, skenování počítačovým tomografem a podobně [8]. Jedno rentgenové vyšetření plic přispívá dávkou 0,1 mSv [6].
- **Spad po zkouškách jaderných zbraní:** Jsou to radioaktivní materiály obsažené v životním prostředí v důsledku zkoušek jaderných zbraní [6].
- **Jaderný a jiný průmysl:** Závody na zpracování jaderného paliva, nemocnice a výzkumné ústavy, vypouštějí do životního prostředí velmi malá množství radioaktivních látek. Globální průměrné dávky z jaderné energetiky jsou asi 0,008 mSv/rok [6].
- **Profesionální ozáření:** Většinou pracuje odhadem na 4 miliony osob, které jsou při své práci vystaveny umělým zdrojům záření a které obdrží průměrnou dávku 1 mSv/rok. Další 5 milionů osob, které pracují v letectví obdrží průměrnou dávku 1,7 mSv/rok [6].
- **Ostatní emise:** Například při spalování uhlí se do ovzduší a popela uvolňuje nezanedbatelné množství radioaktivity. Uhlí totiž obsahuje malé množství uranu.

Nakládá se s 100-200 tisíci tunami uhlí a odpadů asi jednou za rok. Což je obrovské spotřebě uhlí činí ekologické tuny uroztýleného do životního prostředí [9].

- **Výrobky:** Spotřební zboží, které vyžaduje malé množství radioaktivity. Jedná se zejména o detektory kouře, hodinky se svítícím ciferníkem a staré typy televizorů nebo monitorů [6].



Obrázek č.1 Podíl zdrojů ionizujícího záření [6].

3.2 Rozdělení a kategorizace radioaktivních odpadů (RAO)

RAO se podle skupenství rozdělují na:

- pevné,
- kapalné,
- plynné.

Dále se dělí na kategorie:

- Kategorie 1 (přechodné radioaktivní odpady) – jsou to radioaktivní odpady, u kterých klesne radioaktivita za méně než pět let na takovou hodnotu, které umožní jejich uvedení do životního prostředí.

- Kategorie 2 (Nízko a středně aktivní odpady krátkodobé) – jsou to radioaktivní odpady, které lze uložit do povrchových (povrchových nebo podpovrchových) úložišť.
- Kategorie 3 (Nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé) – jsou to radioaktivní odpady, které je nutné, pro jejich vysoký obsah dlouhodobých radionuklidů, uložit do hlubinného úložiště.
- Kategorie 4 (vysokoaktivní odpady) – Jedná se zejména o vyhořelé palivo z jaderných elektráren a odpady z jejich zpracování. Tyto radioaktivní odpady lze po jejich vychladnutí ve ziskladě uložit do hlubinného úložiště [10][2].

3.3 Nakládání s RAO v ČR

V České republice jsou současně dvě dispozice řízení úložišť radioaktivních odpadů:

- úložiště Richardův Litoměřice,
- úložiště Bratrstvíu Jáchymova,
- úložiště v areálu jaderné elektrárny Dukovany.

Tři výše zmíněná úložiště jsou povrchová a slouží k trvalému uložení nízkých a středně aktivních RAO.

Zprovoznění hlubinného úložiště v ČR je plánováno na rok 2065, ale zatím je ve fázi hledání vhodné lokality [2]. Do roku 2015 je nutné identifikovat vhodné a vyloučit nevhodné lokality. K původním šesti lokalitám (Rohozná a Budišov na Vysočině, Lubenec-Blatná v Ústeckém kraji, Pačejov v Plzeňském kraji, Pluhův Žďár-Lodhéřova Božejice - Vlksice v Jihočeském kraji) nyní přibyly i dva vojenské újezdy Boletice a Hradiště. Projekt má být financován z jaderného účtu, kam přispívají všichni účastníci RAO. V současnosti se na jeho kontěna chází přes 12 miliard korun [11].

3.3.1 Úložiště radioaktivního odpadu u Richard



Obrázek č.2. Vchod do úložiště RAORichard.

Foto autor.

Nachází se poblíž Litoměřic, v bývalém vápencovém dole Richard II. Využívá se jen část rozsáhlého důlního díla Richard I, II a III, kde je více jak 40 km chodeb. Vchod do úložiště je zabezpečen proti vniknutí neoprávněných osob a je soustavně hlídán průmyslovou kamerou. (obrázek č.2.) Při vstup do úložiště je nutná identifikace pomocí čipové karty. Chodby byly v roce 1960 až 1964 vyztuženy železobetonovými rámy svýplněmi. V celém úložišti byl vybudován systém drenážní retenční jímky a jednou centrální retenční jímku. Celkový objem prostor úložiště je 17050 m^3 . Z tohoto objemu tvoří samotné komory pro ukládání radioaktivního odpadu asi jen polovinu, zbylou část zabírají chodby pro obsluhu a manipulaci s odpadem.

Celé úložiště je soustavně monitorované. Úložiště jako takové bylo vybudováno v nepropustné desce jílovitého vápence o mocnosti cca 5 m. Prostory, kam radioaktivní odpad ukládáme, se nachází 70 až 80 m pod povrchem země. Nadloží tohoto důlního díla je tvořeno nepropustnými jílovitými slínovci o mocnosti, která přesahuje 50 m. Podloží důlního díla je tvořeno vrstvou nepropustného jílovitého slínovce, která v celém prostoru

podúložíštěmpřesahuje50m.ÚložíštěRichardsenachází nad hladinou podzemních vod, a proto je označováno jako pod povrchové.

Do dnešní doby zde bylo uloženo více jak 28 tisíc obalů s radioaktivním odpadem. Aktivita tohoto odpadu je 1160 TBq. Jedná se zejména o institucionální odpady (odpady vznikající v průmyslu, výzkumu a ve zdravotnictví). Tyto odpady jsou uloženy především ve dvěstělitrových sudech soboustranným zinkováním, které jsou na povrchu opatřeny asfaltovým nátěrem. V blízkosti sudů autor provedl dozimetrické měření radiační dávky. Na snímku je vidět, že hodnota okamžité radiační dávky je 2,44 $\mu\text{Sv/h}$. Což je hodnota velmi nízká pro člověka bezpečná. (obrázek č.3)



Obrázek č.3. Sudy s RAO umístěné v jedné z mnoha komor. Na dozimetrum můžeme vidět okamžitou hodnotu radiační dávky v $\mu\text{Sv/h}$.

Foto autor.

Některé typy odpadů jsou uloženy do stolitrových sudů, které se potom vkládají do sudů dvěstělitrových. Prostor, který mezi sudy vznikne, se vyplní betonovou směsí. Vznikne tak 5 cm tlustá ochranná vrstva. Všechny sudy jsou oboustranně pozinkované, navrchu opatřené asfaltovým mlákem. (obrázek č.4.)



Obrázek č.4. Řez sudem s RAO.

Foto autor.

Sudy jsou poté uloženy do komor, které vznikly při dolování vápence. Komory jsou po naplnění uzavřeny řízí nebo záděny a potom vybetonovány, aby se vyplnily mezery mezi sudy a stěnou komory. K vybetonování prostoru mezi sudy je připraveno kovové potrubí uzavřené u stropu. Tímto potrubím se do komor pod tlakem tlačí beton až do té doby, dokud nezačne vytékat kontrolními otvory u stropu. (obrázek č.5) Tímto opatřením se zamezí možnosti vniknutí podzemní vody do komor s RAO a následnému vyplavení radionuklidů. Sudy, které obsahují izotopy americia nebo plutonia, jsou vzhledem ke svému dlouhému poločas rozpadu uloženy odděleně a zabezpečeným řízím. Tyto RAO jsou v úložišti umístěny pouze dočasně, a to do doby, kdy bude dokončen hlubinný úložiště.



Obrázek č.5. Komora ukládání RAO. V pozadí je vidět železná žebra stropu komory.

Foto autor.

V úložišti je stabilní teplota 10 °C. Odvětrávání prostor zajišťuje ventilace. Radiační monitorování zahrnuje monitorování osob, důlních vod a vod v okolí úložiště a pracovního prostředí uvnitř úložiště. Vedle radiálního monitorování se provádí geotechnická a hydrogeologická měření. Z dosavadních výsledků monitorování vyplývá, že úložiště radioaktivních odpadů Richard odpovídá všem kritériím, která jsou stanovena Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Veškeré hodnoty měřených veličin nepřesahují povolené limity [12].

3.3.2 Úložiště radioaktivního odpadu v Bratrství-Jáchymov



Obrázek č.6. Vstupní areál vchodu do úložiště [13].

Jedná se o úložiště vybudované v bývalém uranovém dole v Jáchymově. (obrázek č. 6) Zde byl v minulosti těžěn smolinec a jsou zde stále přítomné zbytky nevytěženého žilného smolince.

Z tohoto důvodu se stalo důlní dílo Bratrství ideálním prostorem pro ukládání odpadů spřízněných s radionuklidy (především radium a uran).

Úložiště Bratrství v Jáchymově bylo vybudováno v roce 1974. Celkový objem ukládacích prostor je přibližně 1200 m^3 . V současnosti je zde uloženo více jak 2100 sudů s radioaktivním odpadem. Úložiště Bratrství je součástí rozsáhlého důlního díla Bratrství, které sloužilo k těžbě uranové rudy - smolince. Pro ukládání odpadů byla vybrána žební štola, kterou byl vyvážen materiál z lepné jímky „Zaď Bůh“. Tato žební štola o délce 385 m je využívána jako obslužná komunikace. V přílehlých štolách a komorách je ukládán radioaktivní odpad. (obrázek č.7)



Obrázek č.7.Ukládání sudů s radioaktivními odpady [13].

Část stěn a stropů štoly byla ukládání upravena, ale většina je tvořena přirodním materiálem. Podlahy ve všech částech úložiště jsou vybetonovány a opatřeny drenážním systémem s centrální retenční jímkou. Umístění úložiště v bývalém uranovém dole a jeho okolí, které jenavázá na stará důlní díla, kde by letě žensmolinec akdesestálenacházejí jeho nevytěžené zbytky, způsobuje výrazné zvýšení koncentrace radonu. Tomu je nutné přizpůsobit monitorování odvětrání prostor úložiště. Po celou část roku je větrání úložiště přirozené. Pouze v případě, že jsou v úložišti přítomni pracovníci, je použito větrání nucené – ventilátorem. Monitoring je prováděn dozimetricky přímo v prostorech úložiště. Je kontrolována aktivita důlních vod na radium a rozpadové produkty radonu a aktivita ovzduší na radon a jeho produkty. Díky místnímu přirozenému prostředí s vysokým obsahem přirodních radionuklidů, jsou naměřené hodnoty vyšší, než je obvyklé přirozené radiační pozadí v jiných oblastech České republiky. Vzhledem k povaze úložiště jsou prováděna i geotechnická a hydrogeologická měření, která prokázala, že úložiště radioaktivních odpadů Bratrství odpovídá všem bezpečnostním limitům, stanoveným Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Limitní hodnoty zde nejsou překračovány [13].

3.3.3 Úložiště radioaktivních odpadů v Dukovanech



Obrázek č.8. Úložiště radioaktivních odpadů v Dukovanech [14].

Úložiště Dukovany je největším a nejmodernějším úložištěm v České republice. Nachází se v areálu jaderné elektrárny Dukovany v okrese Třebíč. (obrázek č. 8) Zabírá plochu 1,3 ha. V trvalém provozu je úložiště od roku 1995. K dispozici je zde 55 000 m³ prostoru pro uložení více než 180 000 sudů. Jsou zde ukládány nízkoaktivní odpady z dukovanské i temelínské jaderné elektrárny a institucionální odpady z průmyslu, vědeckých zařízení a lékařství. V jaderné elektrárně vznikají dva druhy nízkoaktivních odpadů. Jedná se o pevné odpady a odpadní vody. Pevné odpady se skládají například z kontaminovaných ochranných pomůcek, stavebního materiálu, elektroinstalací a podobně. Tyto odpady jsou lisovány na nízkotlakém lisu do 200-litrových pozinkovaných sudů. Kontaminované odpadní vody z jaderných elektráren se musí nejdříve zahustit, aby se zmenšil jejich objem. Toho se dosahuje odpařováním vody a zahušťováním vzniklé směsi asfaltem. Jde o tzv. bitumenaci. Poté se ze směsi odpaří zbytek vody a směs, kde je podíl pevné složky kolem 40 %, se naplní do 200-litrových sudů a uzavře. Tyto sudy jsou poté označeny a uloženy do betonových jímek. V areálu jaderné elektrárny Dukovany je k dispozici 56 betonových jímek o rozměrech

5,3x5,4x17,3m. Do tohoto prostoru se vejde cca 1620 sudů. Po naplnění jímky sudy se jímka vylije betonem, tím se vyplní vzduchové kapsy mezi jednotlivými sudy a prostora tak hermeticky uzavře. (obrázek č. 9) Navrch jímky se natáhne nepropustná silná černá polyetylenová folie a sepnou se kryje panely. Po celkovém naplnění a uzavření úložiště, což bude kolem roku 2100, bude úložiště oploceno a stráženo nejméně do roku 2400, než se stane odpad v úložišti bezpečným [14].



Obrázek č. 9. Betonování jímky sudy s RAO [14].

Provoz všech úložišť v časně monitorování je zajišťován Správou v souladu s příslušnými povoleními SÚJB, v případě důlních děl i v souladu s oprávněními a povoleními podle báňských předpisů. Kapacita úložišť je při stávající produkci radioaktivního odpadu dostatečná ve výhledu na několik desetiletí (Dukovany do roku 2100, Řež do roku 2070, Bratrství do roku 2030). Nepředpokládá se budování nových úložišť pro nízké a středně aktivní odpady. Optimálně bude využita stávající kapacita úložišť, případně bude zvážena možnost jejich rozšíření [4].

3.4 Nakládání s vysoce aktivními odpady

Způsob uložení jaderného odpadu je několik. Jaderný odpad se dočasně ukládá na 40 - 50 let do meziskladů, dále do vodních bazénů u jaderných reaktorů nebo mimo ně. Využívá se také tzv. suché skladování ve stíněných ocelových kontejnerech, popřípadě v betonových sklípcích nebo betonových kontejnerech. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody a její využití se řídí lokálními potřebami jednotlivých jaderných elektráren. Definitivní uložení jaderného odpadu umožní hlubinné úložiště [4].

3.5 Ukládání radioaktivních odpadů v zahraničí

3.5.1 Švédsko

Ve Švédsku je ukládáním radioaktivních odpadů pověřena firma SKB. Je zřízena provozovatelí jaderných elektráren a svými činnostmi vázána národní legislativou.

Švédské úložiště radioaktivních odpadů nízké a střední aktivity bylo vystavěno na mořském pobřeží ve Forsmarku. Úložiště leží 100 m pod mořskou hladinou v žulovém masivu. Dopravu bylo uvedeno v roce 1988. Radioaktivní odpad se ukládá do kovových kontejnerů, poté je uložen do betonových kobek vybudovaných v žulovém masivu a utěsněno vrstvou jílu [15][16].

Ukládání vysokoaktivních odpadů je, stejně jako v ostatních státech s jadernou energetikou, pouze dočasné. Vysokoaktivní odpady jsou soustředěny do areálu jaderné elektrárny Oskarshamn, kde jsou uloženy v meziskladu. Kazety vyhořelého paliva jsou umístěny v betonových bazénech s vodou. Voda slouží jako chladicí médium a zároveň jako stínění záření. V tomto meziskladu budou ochladnout přibližně 40 až 50 let. Poté bude možno trvale uložit do hlubinného úložiště, pro které se již vybírá vhodná lokalita. Švédové vyvinuli zřejmě nejdokonalější obal pro vysokoaktivní odpady. Kontejner se skládá z litiny a 5 cm tlusté vnější mřížové vrstvy. Tento kontejner bude podle propočtů stabilní několik set tisíc let. Tyto kontejnery budou umístěny do hloubky kolem 500 m a budou obklopeny bentonitovým zásypem. Finální lokalita úložiště bude určena do konce roku 2010 [15][16].

3.5.2 Německo

Německo patří k zemím, které mají největší zkušenosti s budováním i provozem hlubinných úložišť, umístěných převážně v solných formacích. Již v roce 1967 byly zahájeny experimentální výzkumy v podzemní laboratoři Asse. Byl vybrán solný důl v Gorlebenu pro umístění úložiště vyhořelého paliva a navíc v bývalé NDR byl upraven opuštěný důl v Morslebenu pro ukládání nízkostředně aktivních odpadů.

Na základě jednání vlády a provozovatelů jaderných elektráren bylo dohodnuto, že budou postaveny dodatečné skladovací kapacity na vyhořelé palivo; přepracování vyhořelého paliva bude ukončeno do roku 2005, průzkumy v lokalitě Gorleben budou zastaveny do doby, než se vyjasní otázka její bezpečnosti a licenční řízení úložiště Konrád bude ukončeno. Současně byla definována nová strategie ukládání vyhořelého paliva s cílem vybudovat úložiště pro všechny radioaktivní odpady vyhořelého paliva do roku 2030 [15][17].

3.5.3 Belgie

V Belgii je nakládání s radioaktivními odpady pověřena organizace ONDRAD/NIRAS, většinu výzkumných a vývojových činností však provádí SCK-CEN. Belgie se zaměřila na přepracování vyhořelého paliva ve francouzském přepracovatelském závodě Cogema v La Hague a možnosti uložení vzniklých odpadů v jílu. Nitrifikované odpady jsou skladovány ve výzkumném středisku SCK-CEN v Molu, ale pozornost je nově věnována i možnosti přímého uložení vyhořelého paliva a ukládání bitumenovaných odpadů obsahujících transurany. Současný projekt předpokládá úložiště v hloubce cca 250 m, do něhož by se ukládaly zmíněné typy radioaktivních odpadů. Podobně jako v ostatních zemích, je v Belgii ukládání vysoce aktivních odpadů do hlubinných geologických formací založeno na multibariérovém principu. Belgický koncept zvažuje umístění odpadů v kontejnerech z nerezové oceli do vodorovných vrtů o průměru 2 m, utěsnění volných prostor a oddělení od horniny vrstvou betonových prefabrikátů. Současný výzkum potvrzuje, že jílové vrstvy v kombinaci s uvedenými inženýrskými bariérami skýtají účinnou ochranu i během dlouhých časových období. Belgické úložiště má být zprovozněno ve 40. letech tohoto století předpokladem čtyřicetiletého provozu [15][18].

3.5.4 Finsko

Ukládání radioaktivních odpadů ve Finsku zabezpečuje organizace POSIVA. Finská koncepce nakládání s vyhořelým jaderným palivem je založena na jeho přímém uložení do geologického úložiště vybudovaného v granitoidním podloží v lokalitě Olkiluoto, v hloubce 400 metrů. Finský jaderný program se velmi podobá českému, co se rozsahu a výběru granitoidního podloží týče, ale liší se časovým plánem jeho realizace [15][19].

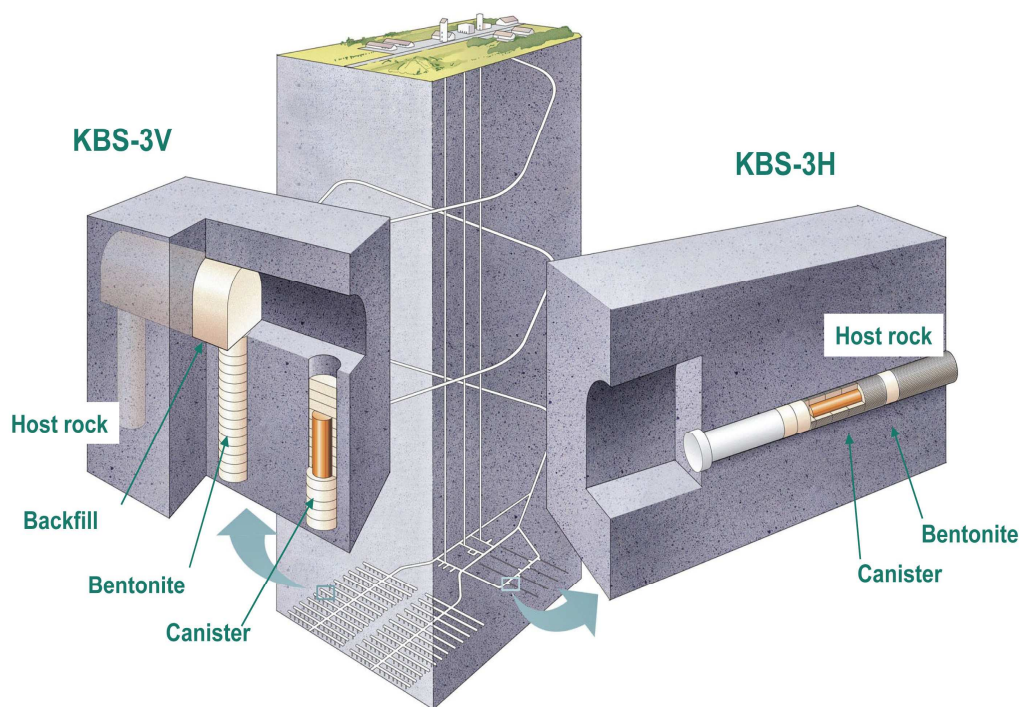
V květnu 1999 podepsala POSIVA kontaktní smlouvu s obcí Eurajoki v blízkosti Olkiluota, kde byl proveden intenzivní hlubinný geologický průzkum. Výstavba konfigurační podzemní laboratoře ONKALO byla započata v roce 2004. V současné době jsou shromažďovány údaje potřebné pro podání žádosti o vydání stavebního povolení, které budou předloženy v roce 2012. Podloží plánovaného úložiště RAO je zkoumáno z hlediska geologie, geochemie a hydrologie [15][19].

Hlubinné úložiště ONKALO se sestává z jednoho přístupového tunelu a tří šachet, jedna obslužná a dvě větrací. Sklon tunelu je 10 %, šířka tunelu 5,5 m a výška 6,3 m. Úložiště je rozděleno do tří částí:

- centrální tunel propojující ukládací tunel s RAO, přístup k tunelu a šachty,
- depoziční tunel s jímky a kanystry s RAO,
- podzemní pomocné technické zařízení.

Celková délka tunelů bude přibližně 42 km [19].

Kanystry budou umístěny do otvorů hlubokých 6 až 8 m v podlaze depozičních tunelů. Otvory s kanystry budou uzavřeny komprimovaným bentonitovým jílem. Alternativně mohou být kanystry umístěny do horizontálních chodeb, lemovaných bentonitovou strukturou. (obrázek č. 10) V horizontálním řešení jsou kanystry obklopené bentonitem a umístěny do perforovaného ocelového krytu. Existují však ještě nejasnosti s horizontálním ukládáním, které se vztahuje k chování bentonitové bariéry v průběhu likvidace [15][19].



Obrázek č.10. Schéma úložiště a uložení kanystrů s vyhořelým palivem [19].

Úložné kanystry jsou masivní kovové sudy. Jejich vnější část je vyrobena z tvárné litiny a vnější obal je vyroben z mědi tloušťky 5 cm. Vnitřní litinová část je dostatečně silná, aby odolávala mechanickému namáhání uvnitř skalního masivu při zemětřeseních nebo tlaku způsobeném kontinentálním ledovcem. Vnější měděná část byla vybrána pro svou extrémní odolnost proti oxidaci. Podle rozsáhlého teoretického a experimentálního výzkumu bylo dokázáno, že životnost kanystru nebude porušena podobu minimálně stotisíc let, a to i ve velmi nepříznivých oxidačních podmínkách. Důkazem je měděné dlato staré několik tisíc let, které bylo nalezeno v Suomussalmi ve Finsku [15][19].

Do úložiště bude ukládáno vyhořelé jaderné palivo ze čtyř jaderných elektráren, které jsou již ve Finsku v provozu a zpáté, která je ve výstavbě. Podle předpokladů by měly být první kanystry s vyhořelým jaderným palivem uloženy v roce 2020 a ukládání se bude pokračovat dalších 100 let. Po čítání se s uložení 2 800 kanystrů s vyhořelým jaderným palivem. Po uzavření úložiště, nebude třeba žádný monitoring. Celkový odhad nákladů na konečnou likvidaci je cca 3 miliardy EUR [15][19].

4. Úprava RAO před uložením

Ještě před tím, než je možné říst o umístění RAO do úložiště, musí RAO projít určitými technologickými procedurami, které minimalizují objem odpadu a zamezí jeho uvolňování do životního prostředí po nezbytně nutnou dobu. Tyto procesy se významně liší podle toho, zda se jedná o nízkou a středně aktivní odpady nebo o vyhořelé jaderné palivo.

4.1. Nakládání s nízkou a středně aktivním odpadem (institucionálním)

Přibližně pětina z celkového množství RAO vznikajícího v České republice jsou institucionální odpady. Institucionální odpady vznikají při práci se zdroji ionizujícího záření a jsou tvořeny zejména použitými ochrannými pracovními pomůckami, prostředky dekontaminace, kontaminovanými kapalinami, vyřazenými přístroji, apod. Může se jednat také o vyřazené etalony nebo uzavřené radionuklidové zářiče, ale to pouze výjimečně. Vznikají ve výzkumu, vývoji, ve zdravotnictví, průmyslu, atd. Nakládání s těmito odpady zajišťuje Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. (ÚJV), který sám vyprodukuje tento odpad a nejvíce v ČR [20][21].

Jedná se o odpady s velmi rozmanitým charakterem, z čehož vyplývá časová a ekonomická náročnost při jejich třídění a dalším nakládání. V průběhu celého procesu nakládání s RAO je nutné evidovat množství a aktivitu radionuklidů. Radioaktivní odpady se rozdělují na pevné, kapalné a plynné. Pevné RAO se shromažďují v polyethylenových pytlích nebo v kovových sudech. Kapalné RAO se shromažďují v těsných polyethylenových lahvích. Podle obsahu radionuklidů se radioaktivní odpady třídí na odpady kontaminované umělými nebo přírodními radionuklidy. Základní třídění radioaktivních odpadů musí být prováděno již při úvodu. V Centru ÚJV se radioaktivní odpady dále vytřídí na pevné (lisovatelné a nelisovatelné), kapalné (vodné, bez vody a obsahující tritium) a speciální (např. jaderné zářiče apod.). Pevné RAO, které nelze lisovat, jsou složeny převážně z kovového odpadu. Pevné RAO, které lze lisovat, obsahují zejména papír, plast, buničinu atd. Většina kapalných odpadů je tvořena vodnými roztoky a malá část organickými rozpouštědly. Pro zpracování lisovatelných pevných RAO je používán nízkotlaký šroubový lis. Lisuje se do 115 l sudů, které se poté vloží do 215 l sudů a zbylý prostor se vyplní betonovou směsí. Vodné kapalné RAO se zahušťují vodparem a

zařízení. Získaný koncentrát je odváděn do homogenizátoru, kde je smíchán s cementovou směsí. Výsledná směs koncentrovaného kapalného RAO s cementem je vypuštěna do 200l nebo 216l sudu. Tato směs může být také použita pro úpravu pevných lisovatelných i nelisovatelných RAO ve 115l sudech [21].

Všechny takto upravené radioaktivní odpady musí splňovat podmínky pro přijetí do úložiště RAO. Pro kontrolu sudů jsou používány dozimetry a spektrometrické přístroje. Kanályze obsahu gama radionuklidů vsudech se používá gamaskener. K získání informací o vnitřním uspořádání radioaktivních odpadů uvnitř sudu se používá radiografické zařízení. Poté jsou upravené radioaktivní odpady transportovány do jednotlivých úložišť RAO. Do úložiště Richard u Litoměřic putují institucionální RAO kontaminované umělými radionuklidy. Do úložiště Bratrství u Jáchymova putují sudy s přírodními radionuklidy a do úložiště Dukovany jsou transportovány sudy s odpadem z energetického jaderného cyklu [20][21].

4.2. Nakládání s nízkostředně aktivním odpadem (z provozu jaderných elektráren)

RAO z běžného provozu jaderných elektráren (dále jen JE) jsou, s výjimkou vysoce radioaktivních odpadů (vyhořelé palivo, součástky z vnitřku reaktoru), po předepsané úpravě ukládány v povrchovém úložišti JE Dukovany.

Hlavní technologií úpravy nízkostředně aktivních kapalných RAO je bitumenace. Jejimi výhodami jsou jednoduchost technologie, stálost bitumenového produktu, radiace odolnost, nízká vyluhovatelnost a snížení objemu odpadů [22]. Základním zařízením je v tomto případě filmová rotorová odparka. Do horní části odparky je nastříkán asfalt a kapalný koncentrát RAO. Lopatky odparky roztírají směs povrchu tak, aby vznikla tenká vrstva, níž se intenzivně odpařuje voda. Zbylé soli, které byly původně obsaženy ve vodě, se mísí s asfaltem. Takto odvodněná směs se nazývá bitumenový produkt a obsahuje asi 40% hmotnostních solí. Bitumenový produkt stéká po stěně odparky a dále je vytápěným potrubím odveden do sudů, kde je automaticky víčkován a odvážen do úložiště.

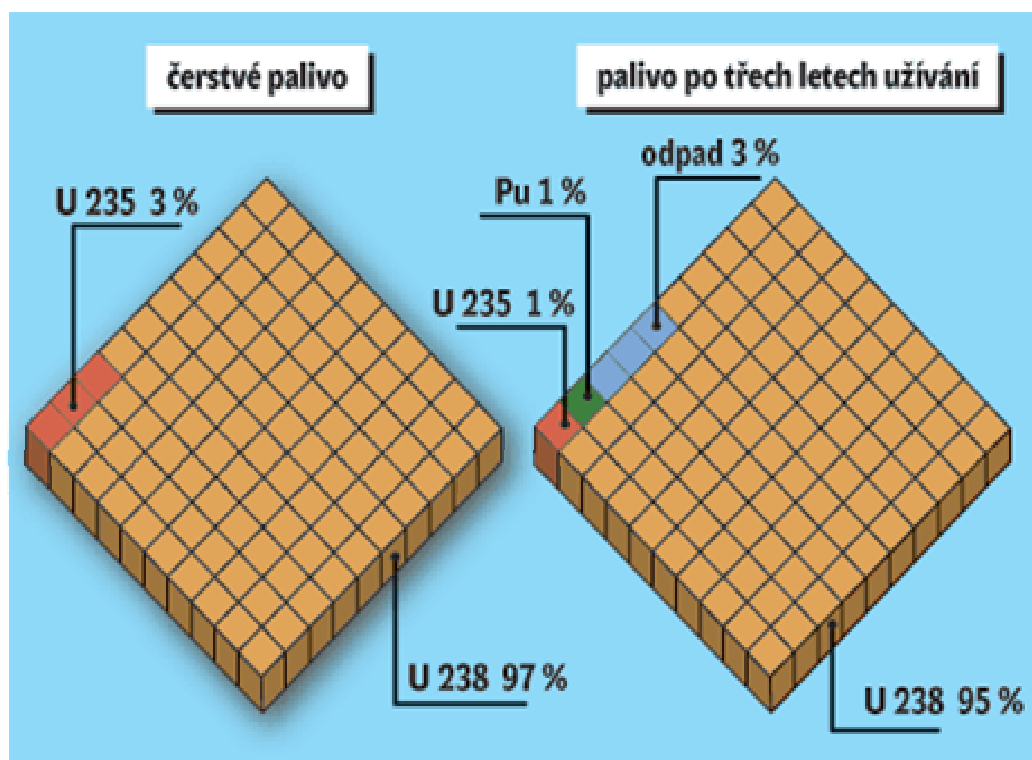
Hlavní technologií zpracování pevných RAO vznikajících v JE je lisování. Pevný RAO je nejprve vytříděn. Toto se provádí v poloautomatickém třídícím zařízením, které

umožňuje oddělení RAO a neaktivních odpadů. Takto vytříbené pevné RAO jsou potom skladovány v úložišti. Při manipulaci prováděné přibližně jednou za deset let jsou skladované RAO vyjmuty, upraveny a trvale uloženy do úložišť. Úprava RAO je dvoustupňová. Pytle s odpadem, který lze lisovat, jsou vkládány do sudů a nízkotlaci lisovány. Odpady, které nelze lisovat, jsou do sudů uloženy volně. Sudy jsou poté odvezeny na pracoviště s vysokotlakým lisem. Vzniklé výlisky jsou poté umístěny do větších sudů o objemu 300 až 400 litrů a trvale uloženy v úložišti RAO Dukovany [23].

4.3. Nakládání s vyhořelým palivem z jaderných elektráren

Za vyhořelé jaderné palivo obvykle považujeme palivové články, které byly v jaderném reaktoru plánovanou dobu. Dotéto kategorie však patří i palivo, které bylo v reaktoru podobu kratší a bylo předčasně vyjmuté, například z důvodu nějakého defektu [24].

Čerstvé jaderné palivo, které používáme v jaderných elektrárnách, se vyrábí z uranové rudy tak, že se obohatí o izotop ^{235}U . Tento tvoří většinou 3 % objemu čerstvého paliva. Zbytek paliva je tvořen uranem ^{238}U . Čerstvé jaderné palivo není nebezpečné pro životní prostředí ani pro člověka. Po ozaření v jaderném reaktoru se jeho složení mění. Z 95 % obsahuje původní ^{238}U , 1 % nespotřebovaného ^{235}U , 1 % plutonia ^{239}Pu a 3 % produktů vzniklých při štěpení. (obrázek č. 10) Právě tato 3 % produktů vzniklých při štěpení můžeme označit za vysoce aktivní dlouhodobý odpad, který je díky své vysoké radioaktivitě vysoce nebezpečný pro životní prostředí. Jedná se zejména o izotopy stroncia, cesia, jodu a sloučenin téměř všech prvků Mendělejevovy tabulky, které vznikly při štěpení jader ^{235}U . Zbytek složky, cca 96 % objemu vyhořelého paliva, lze chemicky oddělit a dále použít jako palivo [25][26].



Obrázek č.11 Izotopické složení čerstvého a vyhořelého paliva lehkých vodních reaktorů [26].

Alternativy konečného nakládání s vyhořelým jaderným palivem vycházejí ze dvou strategií, označovaných jako „otevřený palivový cyklus“ a „uzavřený palivový cyklus“.

Při „otevřeném palivovém cyklu“ je vyhořelé jaderné palivo bez přepracování uloženo do podzemního úložiště. Je to sice momentálně ekonomicky výhodnější než přepracování paliva, ale ztrácíme tím téměř 96 % energeticky využitelné suroviny [26] [27].

U „uzavřeného palivového cyklu“ je vyhořelé jaderné palivo přepracováno a opět použito k výrobě energie. Vzniká jen nepatrné množství nevyužitelných radioaktivních odpadů [26].

V případě, že vyhořelé jaderné palivo skladujeme ve speciálních kontejnerech, je nejlepší taktikou vyčkávat a kontejnery s vyhořelým palivem skladovat ve chráněných skladech řádově několik desítek let. Tímto poskytneme čas na vývoj účinnějších a bezpečnějších technologií zpracování vyhořelého paliva, ale i objevit zcela novou technologii pro využití štěpného materiálu uvnitř těchto kontejnerů [28] [29].

4.3.1 Kontejnery pro transport a skladování

Prototypy ocelových kontejnerů pro transport a skladování použitého jaderného paliva (dále jen PJP) musí vyhovět mechanickým, tepelným a vodotěsným namáháním. Při zkouškách musí kontejner odolávat:

- pádu z výšky 9 metrů na nepoddajný betonový podklad,
- pádu z výšky jednoho metru na ocelový trn vysoký 15 cm a dlouhý 29 cm,
- žáru 800 stupňů Celsia po dobu 30 minut,
- vniknutí vody v hloubce 15 m po dobu osmi hodin.

Při těchto zkouškách se nesmí porušit těsnost kontejneru [6].

„Prototypy kontejnerů jsou ověřovány i v havarijních podmínkách. Například při zkouškách ve Spojeném království narazil dieselový lokomotivový rychlostí 160 km/h na přepravní kontejner, který náraz vydržel bez poškození a zachoval si těsnost. V rámci speciální zkoušky narazil v USA automobil vezoucí kontejner pro přepravu vyhořelého paliva rychlostí 130 km/h do nepoddajné betonové stěny. Do kontejneru pak rychlostí 120 km/h narazil lokomotiva vážící 120 tun. Ani v jednom případě však nebyla narušena těsnost kontejneru. V Německu byla uskutečněna zkouška simulující pád letadla na kontejner TN - 1300 firmy Transnuklear GmbH. Na těsnicí systém víka kontejneru byl vystřelen 5 m dlouhý a tunu vážící projektilem rychlostí zvuku. Kontejner i při tomto nárazu zůstal těsný, jenžebrovaní bylo deformováno.“ [6].

Při skutečně vážné dopravní nehodě by kontejner, který vyhověl při všech zkouškách, mohl být funkčně poškozen v šestipřípadech z tisíce [24].

V ČR se pro skladování i transport PJP z JE Dukovany používá kontejner Castor 440/84. Těleso kontejneru je vyrobeno z tvárné grafitové litiny tloušťky 37 cm, celková hmotnost kontejneru je téměř 120 tun a PJP se v něm může skladovat po dobu 40 let. Kontejner je určen pro 84 kazet PJP z reaktorů typu VVER 440. Kazety jsou v kontejneru rovnoměrně uspořádány ve speciálním koši a obklopuje je heliová atmosféra vysoké čistoty (99,99%).

Těsnost kontejneru je zajištěna dvěma nerezovými víky se speciálním kovovým těsněním. Jako ochrana před poškozením slouží ještě třetí krycí víko. Ochrana povrchu kontejneru je navíc ještě část z polymerního laku a navícnitřní část je provedena niklováním. Velmi dobré stínící vlastnosti kontejneru jsou způsobeny použitím speciální grafitové litiny, ale také použitím řady tyčí ze speciálního polymeru, který zajišťuje snížení neutronového toku. Dvakrát týdně jsou kontejnery, umístěné vsuchém meziskladu JE Dukovany, kontrolovány na těsnost a vývin tepla. (obrázek č. 12) Tyto údaje jsou evidovány a hodnoceny [30].



Obrázek č. 12. Kontejnery Castor 440/84 umístěné vsuchém meziskladu JE Dukovany [30].

4.3.2Přepřeracování vyhořelého jaderného paliva

Jediným standardním procesem pro přepřeracování vyhořelého jaderného paliva je vsoučasnosti technologie PUREX. Tato technologie pro přepřeracování se používá ve Francii, Velké Británii a v Rusku. Základem této technologie je dobrá extrahovatelnost uranu a plutonia z kyselých dusičnanových roztoků roztokem tributylfosfátu. Při separaci se odděluje uran a plutonium, které lze již dnes použít v tepelných lehkovodních reaktorech díky technologii paliva MOX (Mixed Oxid). Tato technologie je využívána ve Francii,

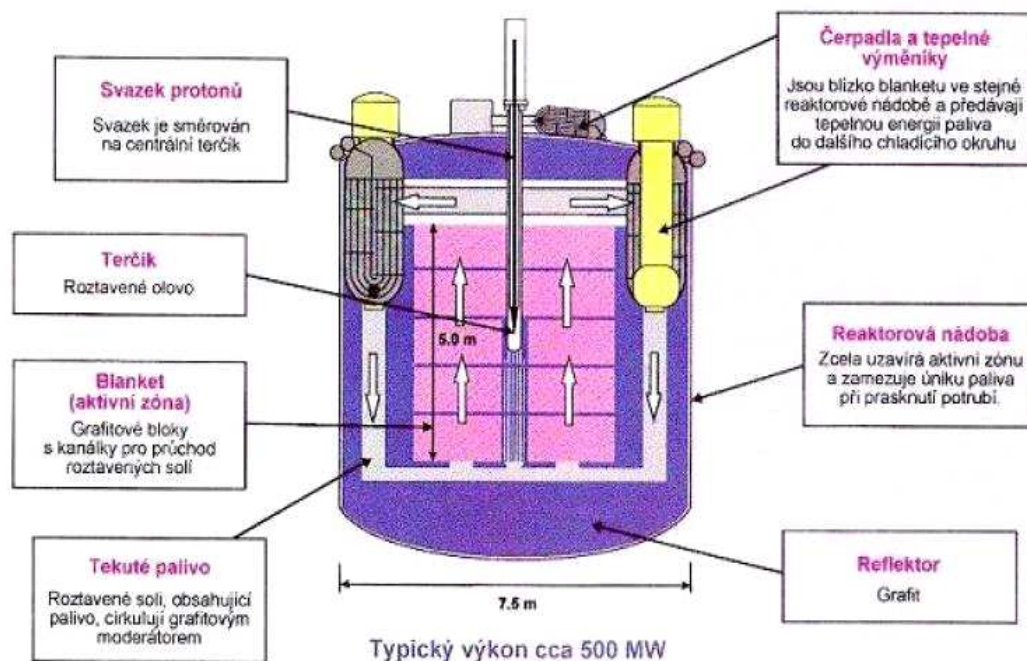
Belgii, Německu a Švýcarsku. Jednou z dalších možností využití MOX paliva je v rychlých reaktorech, kde může mít palivo až 45 % plutonia, a proto se jeho vyhořením spotřebuje více plutonia než v tepelných reaktorech, kde nemůže být obsah plutonia tak vysoký. Při zpracování technologií PUREX je největším problémem odstranění minoritních aktinidů, které se musí ukládat společně se štěpnými produkty tvořícími odpad při samotném zpracování vyhořelého paliva. Tyto vysoce aktivní odpady se vrací zpět do země, která s ním nechala palivo zpracovávat a je nutné je uložit do hlubinného úložiště [25].

4.3.3. ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology)

Perspektivní možností, jak dále energeticky využít vyhořelé jaderné palivo je postup, který se označuje jako ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology), nebo-li urychlovačem řízená transmutační technologie [6] [31].

Podstatou této transmutační technologie je spojení podkritického reaktoru o typickém výkonu 500 MW s urychlovačem protonů. Svazek protonů, který dodává mohutný lineární urychlovač, je směřován na terčík z roztaveného uranu, ve kterém dochází k štěpení jader a uvolňuje se velké množství neutronů. (obrázek č. 13) Radioaktivní odpad, který proudí kanály v grafitových blocích ve formě roztavených solí, je intenzivně osvětlován neutrony. Dochází tak k reakci, při které se radioaktivní izotopy transmutují na radioaktivní izotopy s krátkým poločasem rozpadu nebo na neaktivní izotopy [31].

Při transmutaci prvků se vyvíjí velké množství tepla. Výkon reaktoru je možné regulovat pomocí výkonu urychlovače, při čemž urychlovač samotný spotřebuje asi 20 % vyrobené elektřiny. Jako palivo lze v ADTT použít vyhořelé jaderné palivo, thorium nebo vysoce obohacený uran a plutonium. Výsledkem tohoto procesu budou RAO, které je nutné skladovat jen podobu 30 až 50 let [6].



Obrázek č.13.Schéma podkritického reaktoru urychlovače protonů [6].

Používání ADTT v současnosti brání malá účinnost dodávky neutronů prostřednictvím lineárního urychlovače protonů, a proto nelze očekávat jeho průmyslové použití dříve než za 20 let [6][31].

5. Závěr

Radioaktivní odpady, které vznikají na území ČR, pocházejí z jaderné energetiky, ze zdravotnictví, zemědělství, průmyslu či výzkumu. Obecně se rozdělují na nízkou, střední a vysokou aktivitu. Všechny tyto radioaktivní odpady vyvíjejí radioaktivní záření, které má škodlivé účinky pro člověka a životní prostředí. Proto je třeba tyto odpady izolovat pomocí různých bariér a zamezit jakémukoliv úniku do životního prostředí. Zodpovědnost za nakládání s radioaktivními odpady v ČR nesetátní organizace Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO).

Nízkou a středně aktivní odpady ukládáme do již vybudovaných povrchových nebo podpovrchových úložišť, kde budou uloženy na několik desetiletí až století, než se stanou neškodnými. Tato úložiště jsou neustále monitorována a z výsledků měření vyplývá, že nehrozí únik radionuklidů do životního prostředí.

Vysokoaktivní odpady, zejména použité jaderné palivo, lze natrvalo uložit do hlubinného úložiště. Zde bude uchováno ve speciálních mřížovaných kontejnerech, které se nesmí porušit po dobu na několik set tisíc až milion let. V současné době je na evropském kontinentě hlubinné úložiště budováno pouze ve Finsku. Druhou možností, jak nalozit spoužitým jaderným palivem, je skladování ve speciálních kontejnerech, které jsou uloženy v mezikladech jaderných elektráren a vyčkávat, dokud nebude lidstvu znám jiný způsob jejich zpracování a následného využití. Technologie ukládání vysokoaktivních radioaktivních odpadů nám tuto „vyčkávací strategii“ dovoluje. Technické a technologické bariéry, kterými vysokoaktivní odpady izolujeme od životního prostředí, jsou na velmi vysoké úrovni a po dobu několika desetiletí nehrozí kontaminace životního prostředí. To, zda v budoucnu bude tento odpad pro lidstvo spíše jen surovinou, závisí na výsledcích vývoje nových typů reaktorů a transmutačních technologií. I v případě, že použité jaderné palivo přepracujeme nebo transmutujeme, vznikne určité množství vysokoaktivního odpadu, který bude nutné trvale uložit do hlubinného úložiště, proto se bez hlubinného úložiště v budoucnu neobejdeme.

Vznik radioaktivních odpadů v důsledku lidské činnosti je v současné době, a tím spíše v budoucnu, nevyhnutelný. Zásoby fosilních paliv ubývají a jako náhrada se nabízí jaderná energie. Právě proto lze předpokládat, že se množství těchto odpadů v budoucnu výrazně zvýší. Vznikne tak celé průmyslové odvětví, které se bude zabývat ukládáním,

přepracováním nebo transmutací radioaktivních odpadů. Naše společnost si na tento fakt bude muset zvyknout a brát nakládání s radioaktivními odpady jako samozřejmost, stejně jako v současnosti pokládá za samozřejmé skládání, spalování nebo řízení a recyklaci komunálního odpadu.

Literatura:

- [1] Česko. Zákon č. 18/1997 Sb. Parlamentu České republiky o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In *Sbírka zákonů, Česká republika*, 82, s. 1-21.
- [2] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Koncepce nakládání s radioaktivními odpady vyhořelým jaderným palivem v ČR, Praha, červen 2001 (schválena vládou ČR 15.5.2002)
- [3] SÚRAO: *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. 2009 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.surao.cz/>>.
- [4] SÚRAO [online]. 2009 [cit. 2010-03-28]. Radioaktivní odpady – institucionální az jaderné energetiky. Dostupné z WWW: <<http://www.surao.cz/>>.
- [5] *Rozhodnutí ředitele: SAZBY ODVOD ÚČASTI NA NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY*. Dlážděná 11000 Praha 1: SÚRAO, 1.1.2010. 4 s. Evidenční označení: R Ř 2010-04.
- [6] VAN ĚK, Václav. Publikace: Bezjádrotonepříjem. In *Bezjádrotonepříjem*. [s.l.]: [s.n.], 2008. s. 8-11. Dostupné z WWW: <http://www.nri.cz/c/document_library/get_file?uuid=57bbed05-099b-4e9f-a2fb-4123212b7b7b&groupId=10504>.
- [7] MAREK, Jiří. Jaderná energie. In MAREK, Jiří. *Bezpečnost jaderných elektráren – poznání honením řebasebát*. [s.l.]: ČEZ a.s., 2000. s. 36-39.
- [8] COMBY, Bruno. Environmentalisté pro jadernou energii. Praha: Pragma, 2007. Úvod ekologové pro jadernou energii, s. 56-60. ISBN 978-80-7349-042-3.
- [9] BARAN, Václav. *Jaderná energetika a další problémy moderní civilizace*. Vyd. 1. Praha: Akademie věd České republiky, 2002. Nejen jedy, ale i radioaktivita, s. 18-21. ISBN 80-200-1048-3.

- [10] *Vidivici.cz:surao2* [online].2002[cit.2010-03-16].Jako radioaktivní odpady nakládáme 1. Dostupné z WWW: <<http://www.vidivici.cz/surao2/?c=120>>.
- [11] ŠENK, Michal Popětí letecké záchranou opětrůžkumné práce vytipovaných lokalitách pro úložiště jaderného odpadu: Atomová energie/odpady. In *Popětí letecké záchranou opětrůžkumné práce vytipovaných lokalitách pro úložiště jaderného odpadu* .[s.l.]:[s.n.],02.12.2009[cit.2010-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/79613/po-peti-letech-zacnou-opet-pruzkumne-prace-ve-vytipovanych-lokalitach-pro-uloziste-jaderneho-odpadu>>. ISSN 1803-6686.
- [12] RICHARD: úložiště radioaktivních odpadů. In *RICHARD úložiště radioaktivních odpadů*. Praha: SÚRAO, 2008. s. 16. Dostupné z WWW: <http://www.vidivici.cz/surao2/publikace/Richard_230209_final.pdf>.
- [13] BRATRSTVÍ: úložiště radioaktivních odpadů. In *BRATRSTVÍ úložiště radioaktivních odpadů*. Praha: SÚRAO, 2008. s. 16. Dostupné z WWW: <<http://www.vidivici.cz/surao2/index.php?Lang=CS&c=35>>.
- [14] DUKOVANY: úložiště radioaktivních odpadů. In *DUKOVANY úložiště radioaktivních odpadů*. Praha: SÚRAO, 2004. s. 8. Dostupné z WWW: <<http://www.vidivici.cz/surao2/publikace/dukovany.pdf>>.
- [15] *EU energetika* [online].2007[cit.2010-03-29]. Hlubinné ukládání jaderného odpadu. Dostupné z WWW: <<http://www.energetika-eu.cz/ukladani-jaderneho-odpadu.htm>>.
- [16] *SKB:SvenskKärnbränslehanteringAB* [online].2009[cit.2010-03-30]. Dostupné z WWW: <http://www.skb.se/default____24417.aspx>.
- [17] *BFS:BundesamtFürStrahlenschutz* [online].2010[cit.2010-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.bfs.de/en/bfs>>.

- [18] *ONDRAŤ/NIRAS* [online]. 2010 [cit. 2010-03-30]. Dostupné z WWW: <http://www.nirond.be/engels/1_index_eng.html>.
- [19] *POSIVA: Final Disposal* [online]. 2010 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z WWW: <http://www.posiva.fi/en/final_disposal>.
- [20] KOVAŘÍK, Petr; PODLAHA, Josef. Institucionální radioaktivní odpady: ODPADY, Speciál Minimalizace odpadů. In *Institucionální radioaktivní odpady*. [s.l.]: [s.n.], 16.4.2007 [cit. 2010-03-16]. Dostupné z WWW: <http://odpady.ihned.cz/203-10078640-20893840-E00000_d-921e6c44545b5879bbe3bcc4926eadb2-25350055-11762811079218SvKm-fe>.
- [21] PODLAHA, Josef. Nakládání s institucionálními radioaktivními odpady v Ústavu jaderného výzkumu Řež a.s.. *Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnost jaderné energie*. 2003, č. 11/12, s. 380-387.
- [22] SÁZAVSKÝ, Pavel, et al. Bitumenace kapalných radioaktivních odpadů a předprovozní kontroly pro zajištění její bezpečnosti. *Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnost jaderné energie*. 2002, č. 7/8, s. 245-251.
- [23] KULOVANÝ, Jaroslav. Radioaktivní odpady v jaderné elektrárně Dukovany. *Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnost jaderné energie*. 1999, č. 5/6, s. 165-175.
- [24] MARKOVÁ, Ludmila. Čeho se bojíme: skladování a transport vyhořelého jaderného paliva? Zdokonalování technologií, zpřesňování dozoru a osvětla. *VESMÍR*. 11/1996, 1996, č. 75, s. 71-75. Dostupný také z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanky/clanek/id/4139>>.
- [25] LACIOK, Aleš; MARKOVÁ, Ludmila; VOKÁL, Antonín. Co vyhořelým jaderným palivem: Bezhlubinného úložiště seneo bedeme. *Vesmír*. Duben 2000, 79, s. 190-195.

- [26] OT ČENÁŠEK, Petr. Odpady z palivového cyklu jaderných reaktorů: Zdokonalování technologií, zpřísnění dozoru a osvědčení. *VESMÍR*. 9/2005, 2005, č. 84, s. 536-540. Dostupný také z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanky/clanek/id/6433>>.
- [27] BARAN, Václav. *Jaderná energetika a další problémy moderní civilizace*. Vyd. 1. Praha: Akademie věd České republiky, 2002. Jaderný palivový cyklus, s. 25-29. ISBN 80-200-1048-3.
- [28] COMBY, Bruno. *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha: Pragma, 2007. Bezpečné zacházení s jaderným odpadem, s. 91-105. ISBN 978-80-7349-042-3.
- [29] MAREK, Jiří. Jaderná energie. In MAREK, Jiří. *Jsou radioaktivní odpady limitujícím faktorem rozvoje jaderné energetiky?* [s.l.]: ČEZ a.s., 2000. s. 49-61.
- [30] KUBA, Stanislav. Systém suchého skladování použitého jaderného paliva v ČEZ, a.s. - JEDukovany. *Bezpečnost jaderné energie / Bezpečnost jadrové energie*. 2001, č. 5/6, s. 152-154.
- [31] *Jaderný odpad: Zpětné využití jaderného odpadu* [online]. 2008 [cit. 2010-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderny-odpad.cz/vyuziti-jaderneho-odpadu.htm>>.